

УДК 339.9:658:630

С. А. Голякевич

Белорусский государственный технологический университет

**ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМ АДАПТИВНОГО
УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ РЕАЛИЗАЦИИ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА ХАРВЕСТЕРАМИ**

В статье изложены данные о современном состоянии топливной экономичности отечественных и зарубежных многооперационных лесозаготовительных машин. В частности, для сопоставимых условий работы проводится сравнение топливных затрат харвестеров Komatsu, Ponsse, HSM и Silvatec. Даются сведения о гидравлических насосах, устанавливаемых на белорусскую технику. Указывается, что топливная экономичность отечественных машин ниже в сравнении с зарубежными аналогами. В качестве причины такого расхождения и предмета дальнейшего исследования рассматривается наличие либо отсутствие систем управления, способных производить совместное, адаптивное регулирование элементов привода: двигателя и гидравлического насоса. Указывается, что в качестве исходных данных для регулирования таких систем следует использовать показания датчиков харвестерной головки, а в качестве целевой функции регулирования – расчетное значение энергетического потенциала машины при данных показаниях.

Отдельно рассматривается функционирование перспективной системы управления харвестерами «Амкодор» и приводятся данные о вариантах дальнейшего развития приводов лесозаготовительных машин, основанных на рекуперации энергии движения предмета труда в пространстве. Описываются зависимости изменения энергопотребления манипулятора и харвестерной головки в различных условиях эксплуатации, а также результаты анализа энергетического потенциала харвестеров для различных режимов работы и способов выполнения отдельных операций.

В заключении приводятся конкретные рекомендации по использованию результатов исследования для эксплуатации харвестеров «Амкодор-2551» в лесозаготовительных условиях Республики Беларусь.

Ключевые слова: лесная машина, режим, способ, операция, топливо, расход, производительность, эксплуатация, энергетический потенциал, энергетический баланс.

S. A. Golyakevich

Belarusian State Technological University

**APPLICATION OF ADAPTIVE CONTROL SYSTEMS FOR IMPROVING
THE REALIZATION OF ENERGY POTENTIAL BY HARVESTERS**

The work is devoted to the study of the efficiency of multi-operation forest machines. Results of estimation fuel efficiency of logging machines are given. As a criterion for assessing efficiency, the energy potential of productivity has been adopted. The efficiency of the hydraulic pumps of the drive is analyzed depending on their operation mode. The methods of performing operations for their duration.

The article contains data on the current state of fuel efficiency of Belarusian and foreign multi-purpose forest harvesting machines. In particular, for comparable operating conditions, a comparison is made between the fuel costs of Komatsu, Ponsse, HSM and Silvatec harvesters. It is indicated that the fuel efficiency of Belarusian machines is lower in comparison with foreign analogues. As a reason for this discrepancy and the subject of further research, the existence or absence of control systems capable of producing joint, adaptive control of the drive elements: the motor and the hydraulic pump is considered. It is indicated that as the initial data for the regulation of such systems, the readings of the harvester head sensors should be used, and as the target regulation function, the calculated value of the machine's power potential at the given indications. Separately, the functioning of the perspective control system of the "Amkodor" harvesters is considered and data is given on the options for further development of the drives of logging machines based on the energy recuperation of the movement of the object of labor in space. Dependences of the energy consumption of the manipulator and harvester head in various operating conditions are given as well as the results of the analysis of the energy potential of harvesters for various operating modes and ways of performing individual operations.

In conclusion, specific recommendations on the use of research results for the exploitation of "Amkodor-2551" harvesters in the forest exploitation conditions of the Republic of Belarus are given.

Key words: logging machine, mode, operation, fuel, consumption, productivity, energy potential, energy balance.

Введение. Переход лесозаготовительного производства к механизированной технологии заготовки сортиментов привел к существенному росту себестоимости круглых лесоматериалов. Их структуру преимущественно составляют: балансовая стоимость самих машин, затраты на их ремонт, заработную плату операторов и энергетическое обеспечение машин. Доля затрат на энергетическое обеспечение в общей структуре себестоимости лесоматериалов на сплошных рубках главного пользования в хвойных древостоях при работе комплекса машин «харвестер + форвардер» в среднем составляет 46–63%. В условиях заболоченных, ветровальных, буреломных и низкобонитетных лесосек этот показатель часто превышает 65–70%. Удельный расход топлива у харвестеров [1], работающих на рубках главного пользования, варьируется в широком диапазоне: от 0,493–0,97 л/м³ при работе в высокобонитетных хвойных древостоях с объемом ствола 0,75–1,35 м³ до 1,745–2,87 л/м³ при объеме ствола до 0,13 м³.

Зарубежные харвестеры, работающие в условиях Республики Беларусь, показывают меньшую величину удельного расхода топлива, чем харвестеры производства ОАО «Амкодор». Так, в схожих условиях эксплуатации при объеме ствола сосны 0,30–0,49 м³ удельный расход топлива харвестера «Амкодор-2551» (с двигателем MM3 D260.9) составляет порядка 1,51 л/м³. В тех же условиях для харвестера Ponsse Ergo 8w (двигатель Mercedes-Benz OM906LA) – 0,847 л/м³, для Ponsse Beaver (Mercedes-Benz OM904LA) – 0,947 л/м³, для Silvatec-8266 (Mercedes-Benz OM906LA) – 1,348 л/м³, для Komatsu 901.4 (66CTA) – 0,652 л/м³, для HSM-405H2 8WD (IVECO–175 кВт) – 0,919 л/м³. Как видно, в схожих условиях эксплуатации расход топлива у харвестера «Амкодор-2551» больше до 2,3 раза, или на 0,885 л/м³. Экстраполируя данную величину на средний годовой объем заготовки одного лесхоза 70–120 тыс. м³, получим перерасход топлива 61,95–106,2 тыс. л, что при цене дизельного топлива 1,23 руб/л составляет 76,2–130,6 тыс. руб.

Основная часть Данные экспериментальных исследований указывают на значительные расхождения реальных величин расхода топлива [1]. К примеру, для харвестера «Амкодор-2551» в древостое с породным составом 8С2Е, средним объемом ствола сосны 0,37 м³, ели – 0,31 м³ экспериментально полученные топливные затраты при сплошнолесосечной рубке главного пользования составили 1,172 л/м³ (согласно нормативу, 1,51 л/м³). Исследования проводились на преимущественно равнинной территории с грунтами II типа. Перед началом исследования выполнены работы по расчистке

лесосеки от тонкомерной древесно-кустарниковой растительности.

Структура энергетического потребления многооперационных лесных машин существенно зависит от конструкции самой машины, параметров приводов ее рабочих органов и двигателя, условий эксплуатации и проведенных подготовительных работ на лесосеке, типов выполняемых операций и способов их реализации, скоростных и силовых режимов работы, навыков оператора и параметров систем управления. Основным источником энергии для многооперационных лесных машин являются двигатели внутреннего сгорания, которые устанавливаются в качестве общего источника для технологического оборудования и двигателя (харвестер, форвардер) либо по отдельности для данных потребителей (рубильные машины).

Существенным отличием лесных машин от техники иного назначения является высвобождение большого количества механической энергии при движении предмета труда в процессе направленной валки дерева, при торможении хлыста в процессе обрезки сучьев, при опускании манипулятора на погрузочно-разгрузочных операциях и т. д. Рекуперация данной механической энергии позволит в будущем существенно, сократить энергетическое, а соответственно топливное потребление многооперационных машин. Исследования в данной области активно ведутся иностранными учеными и компаниями [2]. Так, в конструкцию современных манипуляторов для лесозаготовительной техники планомерно внедряются гидравлические рекуператоры. Однако, сейчас их основной задачей является обеспечение плавной работы на пусковых режимах, особенно при одновременном задействовании двух и более гидравлических потребителей [3].

Значительное снижение удельного энергопотребления многооперационных машин также может быть достигнуто за счет использования адаптированных под конкретные условия эксплуатации способов и режимов выполнения операций. Весьма актуальна реализация согласованного регулирования режимов работы двигателя и гидропривода технологического оборудования. Важно реализовать систему автоматизированного регулирования величин давления и расхода в гидросистемах на основе единых исходных данных о параметрах обрабатываемого предмета труда. При этом получившие широкое распространение в сельскохозяйственной технике системы управления, чувствительные к нагрузке (Load Sensing), и системы независимого от нагрузки распределения потока (LUDV flow sharing) не в полной степени соответствуют требованиям, предъявляемым

лесозаготовительными машинами, и являются для них не достаточно прогрессивными [4–10].

Перспективным следует считать создание систем регулирования мощности привода технологического оборудования и трансмиссии с логикой управления, основанной на характеристиках условий движения и предмета труда (диаметр, длина выпиливаемого сортамента, количество участвующих в операции потребителей и др.). На современном этапе развития техники реализация такой системы возможна.

В настоящее время подобная система разрабатывается совместно сотрудниками ОАО «Амкодор» и Kesla GmbH. Ее общая концепция заключается в следующем. В зависимости от интервала диаметра обрабатываемого дерева проводится корректировка величины давления в гидроцилиндрах прижатия передних и задних (при их наличии) сучкорезных ножей и в гидромоторах подающих валцов (рис. 1).

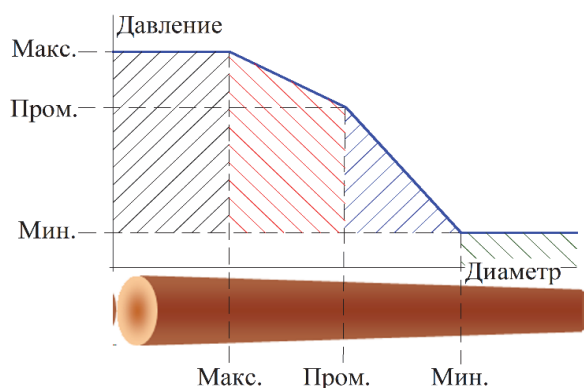


Рис. 1. Принципиальная схема логики регулирования давления

В системе допустимо устанавливать только 3 величины ограничивающих диаметров, т. е. разбивать весь диапазон диаметров на 4 интервала для каждой из пород. Интервалы поддерживаемых в системе давлений указываются посредством программного интерфейса в виде процентной величины относительно максимально допустимого давления гидравлической жидкости в подающей магистрали (рис. 2).

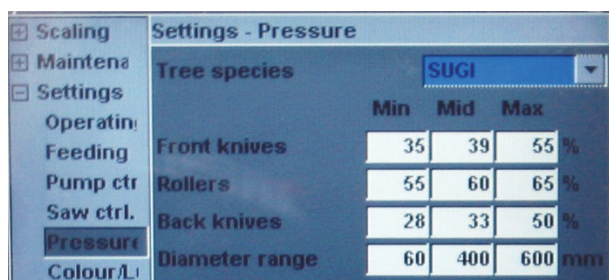


Рис. 2. Программный интерфейс системы управления давлением

При обработке дерева с диаметром менее указанного в строке Diameter range (рис. 2) максимальные давления ограничиваются величинами, указанными в столбце Min. Аналогично, при работе с деревьями диаметром более максимально установленного система не ограничит величину давления. В иных диапазонах она будет регулироваться пропорционально между ограничивающими данный диапазон процентными показателями. Регулирование происходит за счет изменения подачи насоса до уровня расхода на потребителей. Такой подход обеспечивает регулирование давления по кусочно-линейной функции, что достаточно для промышленного использования.

Однако, для эффективного функционирования такой системы необходимы выверенные данные регулирования режима работы привода каждого из потребителей. Решение о параметрах регулирования должно приниматься на основании анализа энергетического баланса машины, работающей в различных условиях эксплуатации. Кроме того, рационально добиваться уровня снижения топлива не только за счет пропорционального регулирования гидронасоса, но и за счет выбора рациональных режимов работы двигателя с учетом КПД работы обоих агрегатов. Однако ни совместное, ни раздельное регулирование частоты вращения коленчатого вала двигателя и подачи гидронасоса в настоящий момент не реализовано, поэтому перспективным направлением является разработка логики такого совместного регулирования.

Под эффективностью работы лесозаготовительной машины будем понимать наименьшую величину времени выполнения каждой операции, приходящуюся на единицу КПД машины в целом, при соблюдении технологических, лесохозяйственных, экологических и эксплуатационных требований в заданных условиях работы. В этой связи первичной задачей исследования являлось определение КПД отдельных агрегатов привода технологического оборудования, КПД технологических операций и продолжительности их проведения [10].

В процессе исследований анализировались режимы работы идеализированного привода технологического оборудования харвестера. В качестве допущений принято: гидравлические и механические потери мощности на участке между гидронасосом и исполнительными органами не зависят от режима работы привода и составляют 15% от потребляемой мощности; КПД гидравлического насоса зависит от давления в системе и его текущей объемной подачи (рис. 3), а также от частоты вращения входного вала гидронасоса (рис. 4, 5); изменение расхода топлива двигателя определяется его теоретическими кривыми нагрузочной и скоростной характеристик. Для

определения энергетических затрат каждой из операций разработаны математические описания работы исполнительных механизмов технологического оборудования. Их анализ проведем на примере сравнения двух способов выполнения операции обрезки сучьев (рис. 6): с прямой подачей дерева вальцами (1) и с надвиганием харвестерной головки манипулятором (2) [11–14].

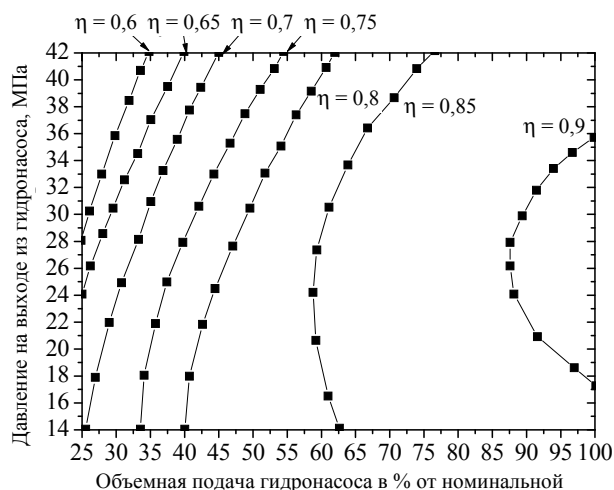


Рис. 3. Зависимость КПД насоса от объемной подачи и давления в гидросистеме. Частота вращения входного вала – 2800 об/мин

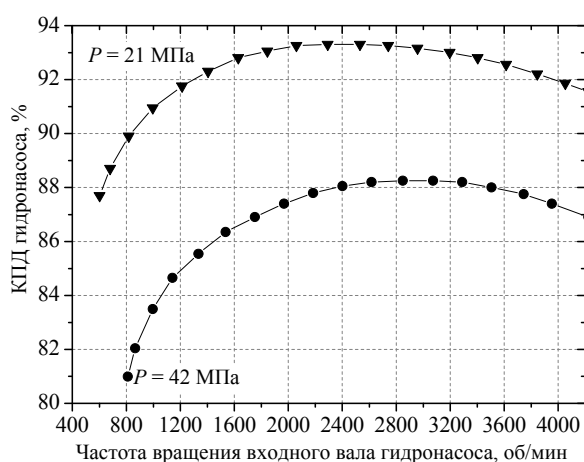


Рис. 4. Зависимость КПД гидравлического насоса от частоты вращения его входного вала. Полная объемная подача

Так, мощность $N_{\text{хг}}(t)$ (Вт), требуемая для обрезки сучьев при подаче дерева вальцами в каждый момент времени t , описывается выражением с ограничивающими неравенствами:

$$\left(0,5(F_p + (F_{\text{приж}} + m_{\text{дер}}g)\mu + F_{\text{ц}}) + \frac{m_{\text{дер}}g(k_{\text{цт}}H_{\text{дер}} - Z_{17})}{H_{\text{дер}} - Z_{17}}f_{\text{кр}} + m_{\text{дер}}\ddot{Z}_{17} \right) \dot{Z}_{17} = N_{\text{хг}}(t);$$

$$N_{\text{хг}}(t) \leq N_{\text{хг}}^{\text{max}} \eta_{\text{хг}}; \ddot{Z}_{17} \leq a_{\text{хг}}^{\text{max}}; \dot{Z}_{17} \leq v_{\text{хг}}^{\text{max}}; Z_{17} \leq L_{\text{сорт}},$$

где $F_p, F_{\text{вол}}$ – силы резания сучьев и сопротивления волочению дерева, Н; $F_{\text{приж}}$ – суммарное усилие прижатия вальцов к обрабатываемому дереву, Н; μ – коэффициент трения качения ствола по направляющему вальцу; $F_{\text{ц}}$ – сила сопротивления вращению вальцов в цапфах, Н; $k_{\text{цт}}$ – соотношение между высотой дерева $H_{\text{дер}}$ (м) и его центра тяжести; Z_{17} – обобщенная координата перемещения дерева в момент времени t относительно харвестерной головки, м; $f_{\text{кр}}$ – коэффициент сопротивления волочению кроны; $N_{\text{хг}}(t)$ – потребляемая мощность привода вальцов харвестерной головки в каждый момент времени, Вт; $\eta_{\text{хг}}$ – КПД привода вальцов харвестерной головки; $N_{\text{хг}}^{\text{max}}$ – мощность привода вальцов харвестерной головки, Вт; $a_{\text{хг}}^{\text{max}}, v_{\text{хг}}^{\text{max}}$ – максимальное ускорение (м/с²) и максимальная скорость (м/с) протаскивания дерева вальцами; $L_{\text{сорт}}$ – длина выпиленного сортимента, м.

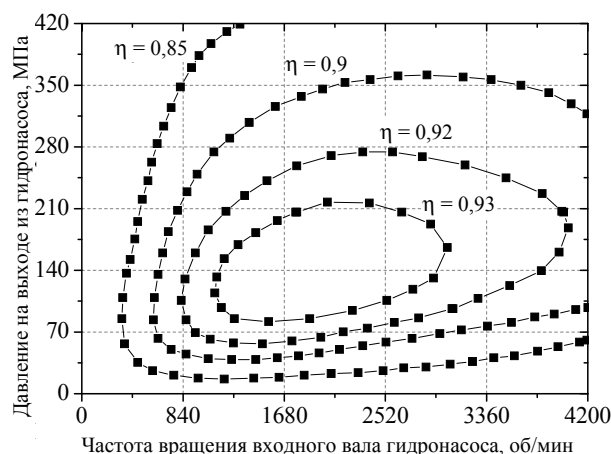


Рис. 5. Зависимость КПД гидравлического насоса от частоты вращения его входного вала и давления в гидросистеме. Полная объемная подача

Мощность $N_{\text{хг}}(t)$ (Вт), потребляемая харвестерной головкой при использовании совмещенной работы с манипулятором, определяется выражением с учетом ограничений:

$$\left(m_r \ddot{Z}_{17} - F_{\text{ман}} + 0,5(F_p + (F_{\text{приж}} + m_{\text{дер}}g)\mu + F_{\text{ц}}) \right) \dot{Z}_{17} = N_{\text{хг}}(t);$$

$$N_{\text{хг}}(t) \leq N_{\text{хг}}^{\text{max}} \eta_{\text{хг}}; \ddot{Z}_{17} \leq a_{\text{хг}}^{\text{max}}; \dot{Z}_{17} \leq v_{\text{хг}}^{\text{max}}; Z_{17} \leq L_{\text{сорт}},$$

где m_r – масса рабочего органа харвестера, кг; $F_{\text{ман}}$ – горизонтальная сила, действующая на харвестерную головку со стороны манипулятора, Н; $\eta_{\text{хг}}$ – коэффициент полезного действия (КПД) привода харвестерной головки.

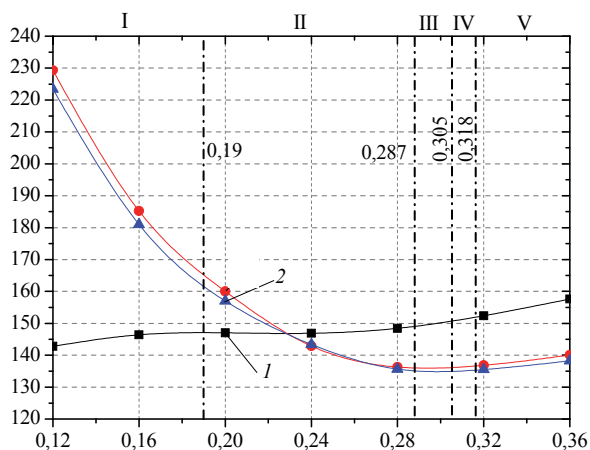


Рис. 6. Оценка эффективности операции обрезки сучьев по величине ЭПД
1 – прямая подача дерева вальцами;
2 – с одновременной работой манипулятора

В случае протаскивания дерева с указанным совмещением усилие волочения $F_{\text{вол}}$ (Н) не влияет на общее усилие протаскивания, но ограничивает область возможного использования такого способа [15]. Для его осуществления в каждый момент времени t поворота манипулятора должно обеспечиваться горизонтальное усилие натяжения подвесной скобы харвестерной головки $F_{\text{ман}}$, не превышающее абсолютно значения силы сопротивления волочению кроны. Иначе будет происходить смещение дерева относительно его начального положения под действием манипулятора. При этом потребляемая приводом механизма поворота манипулятора мощность $N_{\text{пов. ман}}(t)$ в каждый момент времени определяется выражением с учетом ограничений:

$$\left(I_5 \frac{\ddot{Z}_{17}}{l_r} + M_{\text{сопр}} + F_{\text{ман}} l_r \right) \frac{\dot{Z}_{17}}{l_r} = N_{\text{пов. ман}}(t);$$

$$N_{\text{пов. ман}}(t) \leq N_{\text{пов. ман}}^{\max} \eta_{\text{пов. ман}}; \frac{\ddot{Z}_{17}}{l_r} = \ddot{Z}_{16} \leq \varepsilon_{\text{ман}}^{\max};$$

$$\frac{\dot{Z}_{17}}{l_r} = \dot{Z}_{16} \leq \omega_{\text{ман}}^{\max}; Z_{17} = \sqrt{2l_r(1 - \cos(Z_{16}))} \leq L_{\text{сорт}},$$

где I_5 – момент инерции поворота манипулятора ($\text{кг} \cdot \text{м}^2$) при вылете манипулятора l_r (м); $M_{\text{сопр}}$ – момент сопротивления повороту манипулятора в конструкции его опоры, Н·м; $N_{\text{пов. ман}}(t)$ – используемая в момент времени t мощность привода поворота манипулятора, Вт; $N_{\text{пов. ман}}^{\max}$ – максимальная мощность привода поворота манипулятора, Вт; $\eta_{\text{пов. ман}}$ – КПД привода поворота манипулятора; $\varepsilon_{\text{ман}}^{\max}$, $\omega_{\text{ман}}^{\max}$ – максимально допускаемые угловое ускорение ($\text{рад}/\text{с}^2$) и угловая скорость ($\text{рад}/\text{с}$) движения манипулятора; Z_{16} – обобщенная координата

угла поворота стрелы манипулятора в горизонтальной плоскости, рад.

Заключение. Наиболее подходящим техническим критерием для оценки эффективности функционирования многооперационных лесозаготовительных машин следует считать величину энергетического потенциала производительности, которая в общем случае представляет собой отношение полного времени цикла к КПД работы машины. В связи с тем, что показатель КПД машины является интегральным показателем КПД двигателя и привода, КПД конструкции технологического оборудования и другого, при выполнении исследований целесообразно рассматривать эти величины в виде функциональных зависимостей от режимов и способов выполнения операций, которые, в свою очередь, также обладают собственными величинами КПД.

Также следует отметить, что повышение эффективности работы отдельной машины в системе часто вызывает еще более значительное снижение эффективности работы машины, продолжающей лесозаготовительный процесс после нее. К примеру, прирост эффективности работы харвестера за счет исключения операции подсортировки сортиментов может в последующем привести к значительным затруднениям и снижению эффективности работы форвардера. Поэтому при анализе эффективности работы систем машин функция энергетического потенциала должна рассматриваться как общая для всего технологического процесса, а не для каждой машины в отдельности.

Анализируя результаты моделирования (рис. 6) режимов и способов выполнения отдельных операций, следует отметить, что для рассмотренного харвестера «Амкодор-2551» операция обрезки сучьев с деревьев в сосновых древостоях при $d_{1,3}$ до 0,19 м (рис. 6 обл. I) характеризуется возможностью использования только прямого способа подачи дерева вальцами на сучкорезные ножи, что связано с малой массой предмета труда. В сосновых древостоях с $d_{1,3}$ от 0,19 м до 0,287 м (обл. II) возможно использовать оба рассматриваемых способа. Однако эффективность применения способа с совмещением в древостоях с $d_{1,3}$ до 0,225 м до 8–11% ниже, чем при выполнении операции без совмещения, что обусловлено необходимостью повторного перемещения дерева к месту раскряжевки после выполнения операции таким способом, и увеличивает продолжительность обработки одного дерева на 4–7 с. Проведение операции обрезки сучьев в сосновых древостоях с $d_{1,3}$ более 0,287 м при использовании способа с непосредственной подачей дерева вальцами невозможно по причине недостаточного

тягового усилия протаскивающих вальцов (до 23 кН). При этом применение способа обрезки сучьев с дополнительной подачей харвестерной головки манипулятором возможно до $d_{1,3} = 0,32$ м. Анализируя способ с дополнительной подачей головки манипулятором, рассматривался случай, при котором тяговое усилие манипулятора составляет 75% от силы сопротивления волочению кроны дерева. Поэтому в случае выполнения обрезки сучьев таким способом максимальный обрабатываемый диаметр дерева $d_{1,3}$ может быть увеличен за счет большего усилия

подачи манипулятором, но не более силы сопротивления волочению кроны дерева.

Для регулирования работы привода технологического оборудования харвестеров целесообразно использовать системы адаптивного управления, работа которых должна основываться на показаниях датчиков диаметра и вводимых характеристик породы дерева, а в качестве целевой функции регулирования системы должна использоваться теоретическая величина энергетического потенциала производительности машины, рассчитанная по указанным показателям.

Литература

1. Нормы расхода топлива на многооперационную лесозаготовительную технику в организациях Мин-ва лесного хоз-ва и рекомендации по их применению. Минск, 2011. 50 с.
2. Голякевич С. А. Анализ эксплуатационных режимов работы многооперационных лесозаготовительных машин // Труды БГТУ. 2013. № 2: Лесная и деревообраб. пром-сть. С. 72–78.
3. Gellerstedt S. Operation of the Single-Grip Harvester: Motor-Sensory and Cognitive Work // Journal of Forest Engineering. 2002. Vol. 13, no. 2. P. 45–47.
4. Жулай В. А., Тюнин В. Л. О КПД тягового привода самоходных колесных землеройно-транспортных машин // Научный вестник ВГАСУ. 2015. № 1: Высокие технологии. Экология. С. 260–265.
5. Селиванов Н. И., Запрудский В. Н. Энергетический потенциал колесных 4К4 тракторов общего назначения // Вестник КГАУ. 2012. Вып. 6. С. 156–162.
6. Гинзбург Ю. В. Швед А. И., Парфенов А. П. Промышленные тракторы. М.: Машиностроение, 1986. 296 с.
7. Гороновский А. Р., Голякевич С. А. Выбор эффективных параметров привода многооперационных лесозаготовительных машин // Деревообработка: технологии. Оборудование. Менеджмент XXI века: труды V Евразийского симпозиума / под науч. ред. М. В. Газеева. Екатеринбург, 2010. С. 54–59.
8. Гороновский А. Р., Голякевич С. А. Применение энергетического потенциала производительности при оценке эффективности работы лесозаготовительных машин: материалы Междунар. науч.-практ. конф. «Устойчивое управление лесами и рациональное лесопользование», Минск, 18–21 мая 2010 г. В 2 ч. Минск: БГТУ, 2010. Ч. 1. С. 140–144.
9. Голякевич С. А., Гороновский А. Р. Эффективность работы многооперационных лесозаготовительных машин с учетом ограничивающих факторов // Труды БГТУ. 2012. № 2: Лесная и деревообраб. пром-сть. С. 8–11.
10. Golyakevich S., Goronovskiy A. Workload estimation of harvesters during the operations of work cycle // Transport. Issue 28 (3), Vilnius. 2013. P. 323–330.
11. Сидоров Б. А. Исследование процесса обрезки сучьев самоходной сучкорезной машиной ЛП-51 с непрерывной подачей: дис. ... канд. техн. наук: 05.21.01. Л., 1981. 254 с.
12. Ракутько С. А. Энергоемкость как критерий оптимизации технологических процессов. Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2008. № 12. С. 54–56.
13. Коломинова М. В. Повышение эффективности производства круглых лесоматериалов путем обоснования технологии с минимальной энергоемкостью (в условиях Республики Коми): автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.21.01. Санкт-Петербург, 2001. 21 с.
14. Жуков А. В. Теоретические основы выбора технических параметров и улучшения эксплуатационных свойств специальных лесных машин: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.21.01. Л., 1987. 315 с.
15. Голякевич С. А. Повышение надежности несущих конструкций многооперационных лесных машин выбором режимов работы на основе энергетического потенциала: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Минск, 2013. 27 с.

References

1. Normy raskhoda topliva na mnogooperatsionnuyu lesozagotovitel'nyuyu tekhniku v organizatsiyakh Min-va lesnogo khoz-va i rekomendatsii po ikh primeneniiyu. Minsk, 2011. 50 p. (In Russian).
2. Golyakevich S. A. Analysis of operational modes of operation of multi-operative logging machines. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2013, no. 2: Forest and Woodworking Industry, pp. 72–78 (In Russian).

3. Gellerstedt S. Operation of the Single-Grip Harvester: Motor-Sensory and Cognitive Work. *Journal of Forest Engineering*. 2002. Vol. 13, no. 2. P. 45–47.
4. Zhulay V. A., Tyunin V. L. On the efficiency of traction drive of self-propelled wheeled earth-moving vehicles. *Nauchnyy vestnik VGUASU* [Scientific bulletin], 2015, no. 1: High technologies, Ecology, pp. 260–265 (In Russian).
5. Selivanov N. I., Zaprudskiy V. N., Power potential of wheeled 4K4b tractors of general purpose. *Vestnik KGAU* [Bulletin NGAU], 2012, no. 6, pp. 156–162 (In Russian).
6. Ginzburg Ju. V., Shved A. I., Parfenov A. P. *Promyshlennyye traktory* [Industrial tractors]. Moscow, Mashinostroeniye Publ., 1986. 296 p.
7. Goronovskiy A. R., Golyakevich S. A. Selection of effective parameters for the drive of multi-operation forest machines. *Derevoobrabotka: tekhnologii, oborudovaniye. Menedzhment XXI veka* [Woodworking. Technologies, equipment, management XX centuries], 2010, pp. 54–59 (In Russian).
8. Goronovskiy A. R., Golyakevich S. A. Application of the energy potential of productivity in evaluating the efficiency of forest machines. *Materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. («Ustoychivoye upravleniye lesami i ratsional'noye lesopol'zovaniye»)* [Materials of the Interregional Scientific and Practical Conference (“Steady management of the woods and rational forest exploitation”)]. Minsk, 2010, pp. 140–144 (In Russian).
9. Golyakevich S. A., Goronovskiy A. R. Efficiency of multi-operation logging machines taking into account limiting factors. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2012, no. 2: Forest and Woodworking Industry, pp. 8–11 (In Russian).
10. Golyakevich S., Goronovskiy A. Workload estimation of harvesters during the operations of work cycle. *Transport*. 2013, issue 28 (3), Vil'nyus, pp. 323–330.
11. Sidorov B. A. *Issledovaniye protsessa obrezki such'yev suchkoreznoy mashinoy LP-51 s nepreryvnoy podachey. Dis. kand. tekhn. nauk* [Research of the process of trimming of branches by the self-propelled delimbing machine LP-51 with continuous feeding. Kand. Diss.]. Leningrad, 1981. 254 p.
12. Rakutko S. A. Energy intensity as a criterion for optimization of technological processes. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo khozyaystva* [Mechanization and electrification of agricultural], 2008, no. 12, pp. 54–56 (In Russian).
13. Kolominova M. V. *Povysheniye effektivnosti proizvodstva kruglykh lesomaterialov putem obosnovaniya tekhnologii s minimal'noy energoemkos'tyu (v usloviyakh Resp. Komi): Avtoref. dis. kand. tekhn. nauk* [Increasing the efficiency of roundwood production by justifying the technology with minimum energy intensity (in the conditions of the Komi Republic). Abstract of thesis. Cand. of tech. sci.]. St. Petersburg, 2001. 21p.
14. Zhukov A. V. *Teoreticheskiye osnovy vybora tekhnicheskikh parametrov i uluchsheniya ekspluatatsionnykh svoystv spetsial'nykh lesnykh mashin: Avtoref. dis. doct. tekhn. nauk* [Theoretical bases of a choice of technical parameters and improvement of operational properties of special forest machines Abstract of thesis. Cand. of tech. sci.], Leningrad, 1987. 315 p.
15. Golyakevich S. A. *Povysheniye nadezhnosti nesushchikh konstruktsiy mnogooperatsionnykh lesnykh mashin vyborom rezhimov raboty na osnove energeticheskogo potentsiala: Avtoref. dis. kand. tekhn. nauk* [Increasing the reliability of load-bearing structures of multi-operation forest machines by selecting operating modes based on the energy potential. Abstract of thesis cand. of tech. sci.]. Minsk, 2013. 27 p.

Информация об авторе

Голякевич Сергей Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры лесных машин и технологии лесозаготовок. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: gsa@belstu.by

Information about the author

Golyakevich Sergey Aleksandrovich – PhD (Engineering), Assistant Professor, the Department of Forestry Machinery and Logging Tehnology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: gsa@belstu.by

Поступила 27.03.2017